

УДК 622.7

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ АКТИВНОСТЕЙ
РАЗНЫХ ФОРМ СОРБЦИИ РЕАГЕНТА НА СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛАХ**

С. А. Кондратьев¹, Н. П. Мошкин², Е. А. Бурдакова¹

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: kondr@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, E-mail: nikolay.moshkin@gmail.com,
просп. Академика Лаврентьева, 15, 630090, г. Новосибирск, Россия

Дана численная оценка соотношения активностей физической и химической форм сорбции реагента на сульфидных минералах. Сделан ряд допущений: 1) основным кинетическим ограничением образованию флотационного контакта является прослойка жидкости, разделяющая минеральную частицу и пузырек газа; 2) вклад в удаление жидкости из прослойки вносятся обеими формами сорбции реагента; 3) объем жидкости, удаляемый физической формой сорбции реагента, определяется разностью объемов жидкости в прослойках, ограниченных поверхностями менисков с наступающим Θ_A и отступающим краевыми углами Θ_R , имеющими радиус шейки R . Объем жидкости, удаляемый в результате действия поверхностных сил (гидрофобных, дисперсионных), не учитывался по причине низкой плотности и мозаичности закрепления реагента. Приведены результаты экспериментальных работ по определению предельных значений наступающих и отступающих статических контактных углов на поверхности ряда сульфидов цветных металлов. Показано, что селективность флотационного разделения сульфидов зависит от соотношения объемов жидкости, удаляемых десорбируемой физической и недесорбируемой химической формами сорбции реагента. Предложенный метод оценки селективности пригоден для минералов с близкими поверхностными свойствами, когда стабилизирующее ионно-электростатическое взаимодействие минералов с пузырьками газа отсутствует или незначительно. Результаты расчета могут быть полезны для оптимизации собирательной способности физически закрепившегося малополярного или десорбируемых производных форм ионногенного реагента с целью повышения селективности разделения сульфидных минералов.

Флотация, сульфиды, физическая и химическая форма сорбции, минеральная частица, мениск, критическая толщина прослойки, селективность

Введение. В практике пенной флотации селективное извлечение требуемого минерала из суспензии достигается за счет повышения свободной энергии границы раздела “твердое тело – жидкость” в результате введения в раствор соответствующих реагентов-собирателей, регулирования Eh и pH пульпы. Специфическое химическое взаимодействие анионов сульфгидрильного реагента с катионами кристаллической решетки (хемосорбция) приводит к образованию адсорбционного слоя с “обратной” ориентацией: гидрофобный углеводородный радикал обращается в

полярную водную среду, а полярные группы закрепляются на минеральной поверхности. Термодинамически невыгодная ориентация (вопреки правилу уравнивания полярности Ребиндера) возможна, если обусловленное этим возрастание свободной поверхностной энергии тела σ_{S-L} компенсируется убылью свободной энергии за счет энергии хемосорбционного взаимодействия. Образование подобных адсорбционных слоев вызывает гидрофобизацию твердой поверхности и снижение смачивания. Гидрофобизация минерала способствует прорыву прослойки, образовавшейся в момент встречи минеральной частицы с пузырьком газа, ускоряет истечение воды из нее и увеличивает скорость перемещения линии смачивания по грани частицы.

Разделение сульфидов и минералов вмещающих пород: силикатов, окислов — не представляет трудностей. Водная прослойка на минералах вмещающих пород достаточно устойчива. Ее устойчивость обязана электростатическому отталкиванию поверхностей раздела “газ–жидкость” и “твердое–жидкость” при перекрывании их граничных слоев [1]. В практике флотации устойчивость прослойки достигается регулированием рН пульпы. Метилирование поверхности кварца не изменяет ее заряд [2]. Влияние рН пульпы на краевой угол Θ на несulfидных минералах происходит по следующей схеме. Изменение рН раствора приводит к сдвигу потенциала минеральных частиц, присутствующих в суспензии. Величина и знак скачка потенциала зависят от природы минерала, состава пульпы. Например, у кварца с увеличением рН раствора происходит увеличение отрицательного заряда его поверхности и соответствующее уменьшение σ_{S-L} . Это связано с адсорбцией гидроксильных ионов минеральной поверхностью и приобретением ею отрицательного заряда. Появление заряда на минерале приводит к ориентации полярных молекул воды по полю. Действующие между ними силы отталкивания вызывают уменьшение σ_{S-L} [3]. Межфазное натяжение σ_{S-L} тем меньше, чем сильнее взаимодействие между фазами, чем ближе они по полярности. Усиление взаимодействия молекул воды с минеральной поверхностью придает устойчивость прослойке.

Системы сульфидный минерал–вода являются Eh –рН контролируемыми (окислительно-восстановительные процессы, гидролиз). В связи с этим разделение сульфидов представляет более сложную задачу. Для локального прорыва прослойки необходимо отрицательное значение расклинивающего давления, которое реализуется при соответствующих значениях его ионно-электростатической и структурной составляющих, повышенных значениях σ_{S-L} и краевого угла. Повышение скорости расширения “сухого” пятна на минерале, образовавшегося после локального прорыва прослойки, достигается увеличением разности равновесного краевого Θ_0 и отступающего контактного углов Θ_R .

Исследованиями [4, 5] установлено, что на гидрофобных поверхностях на величину краевого угла Θ_0 основное влияние оказывает структурирование жидкости. В работе [4] выполнены расчеты устойчивости смачивающих пленок водных растворов с учетом трех составляющих расклинивающего давления: электростатической, молекулярной и структурной. Установлено, что для получения сравнительно больших краевых углов 60 – 80° , формирующихся на плохо смачиваемых поверхностях, необходим учет гидрофобной составляющей расклинивающего давления. Численное моделирование значений краевого угла показало, что его существенный рост на поверхности кварца возможен только в случае отрицательного значения расклинивающего давления, обусловленного электростатическими и структурными силами.

В [5] моделирование больших значений краевых углов на гидрофобной поверхности выполнялось в зависимости от величин потенциалов и степени гидрофильности поверхностей, граничащих с жидкой прослойкой. Заметное влияние электростатических сил на величину кра-

евого угла наблюдается при больших значениях и различных по знаку потенциалах частицы и пузырька, что в практике флотации встречается редко. Роль гидрофобных сил в определении краевого угла существенна в случае отсутствия поверхностно-активных веществ на пузырьке.

Высокие показатели флотации достигаются, если на минеральной поверхности отсутствует заряд или при изоэлектрическом ее состоянии. Появление заряда, во-первых, приводит к структурированию прилегающих слоев жидкости, снижению σ_{S-L} и повышению устойчивости толстых прослоек. Во-вторых, заряд минеральной поверхности препятствует закреплению поверхностно-активных по отношению к границе раздела “газ–жидкость” молекул реагентов. В [5] уменьшение σ_{S-L} при появлении заряда на минеральной поверхности не учитывалось. Константа гидрофобных сил и характеристическая длина, определяющая дальное действие этих сил, подбирались без учета зависимости гидрофобности от поверхностного заряда. Подбор величины потенциала на границе раздела “минерал–жидкость” для получения заданного значения краевого угла должен сопровождаться неизбежной корректировкой σ_{S-L} в связи с изменением структурной составляющей расклинивающего давления. Можно предположить, что в области больших значений краевых углов основное влияние на их величину оказывает гидрофобная составляющая расклинивающего давления.

Близкие результаты получены в работах [6–8]. Исследовалось истечение жидкости из прослоек, расположенных на необработанной (отступающий краевой угол $\Theta_R = 17^\circ$) и обработанной амиловым ксантогенатом (отступающий краевой угол $\Theta_R = 81^\circ$) пластинах золота. Показано, что истечение жидкости из прослойки первоначально обусловлено капиллярным давлением, создаваемым кривизной границы раздела “газ–жидкость”. В дальнейшем на истечение жидкости оказывают влияние поверхностные силы. Истечение из прослойки, граничащей с обработанной ксантогенатом пластиной золота, происходит значительно быстрее, ее прорыв отмечен при толщине 40 нм. На необработанной пластине золота прослойка с равновесной толщиной 103 нм оказалась стабильной [6]. Неустойчивость прослойки в первом случае авторы объяснили отрицательным значением гидрофобной составляющей, которая по абсолютной величине превысила другие составляющие расклинивающего давления. Во втором случае устойчивость прослойки обязана дальнедействующему электростатическому отталкиванию.

Аналогичные результаты приводятся в [7, 8]. Показано, что применение ксантогената для гидрофобизации поверхности золота привело к повышению давления в прослойке относительно давления в объеме окружающей жидкости. Отрицательная величина структурной составляющей расклинивающего давления, моделирующая избыточное давление в прослойке, обусловила появление силы, превышающей сумму сил электростатического и молекулярного отталкивания, ускорившей истечение жидкости из прослойки. Применение ксантогената с целью гидрофобизации поверхности золота увеличивает абсолютное значение структурной составляющей расклинивающего давления и улучшает кинетику истечения жидкости из прослойки.

Краткий анализ приведенных работ показал, что для прорыва прослойки и формирования флотационного контакта необходимо применение флотационного реагента, повышающего σ_{S-L} . Контактный угол Θ зависит в основном от гидрофобной составляющей расклинивающего давления, т. е. от свойств и плотности сорбции химически закрепившегося флотационного реагента и в значительной степени контролируется объемной его концентрацией. Ионно-электростатическое взаимодействие в условиях флотационного разделения сульфидов не является определяющим. Во-первых, при минимальной величине заряда на минеральной поверхности создаются наиболее благоприятные условия для прорыва прослойки воды и физической сорбции молекул, активных по отношению к границе раздела “газ–жидкость”. Во-вторых, использование “свежих”

пузырьков, не содержащих поверхностно-активных веществ и не имеющих заряда, способствует повышению показателей флотации [9]. Также доказано, что высокое поверхностное натяжение пульпы, достигаемое при применении слабых пенообразователей, сокращает время индукции [10].

Селективное флотационное разделение сульфидов при соответствующем выборе параметров рН и Eh пульпы связано с большей скоростью формирования гидрофобного покрытия на извлекаемом минерале по сравнению с минералами спутниками (применение специальных реагентов в статье не рассматривается). Например, селективная флотация пентландита выполняется в щелочной среде [11]. При высоких рН происходит интенсивная депрессия пирротина и пирита. Аналогично для селективного флотационного разделения халькопирита и молибденита необходимо поддерживать величину рН на уровне 11.5. Вопрос влияния потенциала пульпы на селективность разделения сульфидов также рассматривался в [11]. Экспериментально показано, что окисление перед флотацией улучшает флотацию пентландита и его селективность разделения.

Другой важный параметр, влияющий на качество разделения сульфидов, — объемная концентрация реагента, необходимая для обеспечения гидрофобизации полезного компонента с целью требуемого его извлечения. Излишняя подача реагента-собирателя ухудшает качество концентрата, так как увеличивается попадание в концентрат сульфидов спутников [12]. Эксперимент показывает, что достаточная для извлечения требуемого минерала плотность составляет 2–20 % от условного монослоя.

Возможности повышения селективности разделения сульфидов с близкими поверхностными свойствами ($\zeta \cong 0$) изменением параметров флотационной системы рН и Eh , концентрации реагента в пульпе ограничены. Разность критических толщин прослоек на разделяемых сульфидах недостаточна для получения качественного концентрата.

В [13] рассмотрен вопрос повышения качества концентрата изменением собирательной способности реагента, представленного на минеральной поверхности физической формой сорбции. Показано, что для минералов с близкими поверхностными свойствами ($\zeta \cong 0$) селективность разделения будет зависеть от соотношения собирательных способностей химически и физически закрепившихся форм реагента.

Задачи исследования. Основная задача настоящей работы — поиск методов определения оптимального соотношения собирательных активностей химической и десорбируемой физической форм сорбции реагента. Будем предполагать, что удаление части жидкости из прослойки связано с действием физически сорбированного реагента. Обоснованием такого предположения являются флотация гидрофобных материалов (угля, молибденита) одним малополярным реагентом и исследования, выполненные в [13]. Десорбируемая форма реагента действует по следующей схеме. В момент столкновения гидрофобной минеральной частицы с пузырьком и перекрытия приповерхностных слоев расклинивающее давление имеет отрицательное значение. Увеличение скорости истечения воды из прослойки приводит к ее локальному прорыву с образованием мениска, имеющего наступающий контактный угол Θ_A . В этот момент устанавливается контакт границы раздела “газ–жидкость” с поверхностью минерала. Сорбированные минералом поверхностно-активные по отношению к указанной границе раздела формы реагента переходят на поверхность мениска и вследствие высокой скорости растекания увлекают в свое движение воду, находящуюся в прослойке между объектами взаимодействия. Скорость растекания пленки десорбируемых форм реагента и отсутствие ее гидрофобного проскальзывания по поверхности воды — факторы, определяющие время удаления воды из прослойки. Форма мениска, ограничивающего прослойку, в результате оттока воды будет меняться от мениска с наступающим контактным углом Θ_A до мениска с отступающим динамическим углом Θ_{RD} . Будем предполагать, что разность объемов воды, содержащейся в прослойках с указанными менисками, определит

количество воды, удаленной десорбируемой формой флотационного реагента. Таким образом, цель настоящей работы достигается определением разности объемов воды, содержащейся в прослойках, и оценкой соотношения собирательной способности физически и химически закрепившихся форм флотационного реагента по величине объемов вытесненной воды.

Низкая плотность сорбции мозаично закрепившегося реагента [14] доказывает достаточность локальной гидрофобизации минерала для выполнения условий образования флотационного контакта. Локальность закрепления на извлекаемом минерале флотационного реагента в свою очередь указывает на возможность перемещения линии смачивания по грани минерала не только за счет гидрофобного эффекта. В [13] показано, что десорбируемые с минеральной поверхности после локального прорыва прослойки производные формы реагента оказывают влияние на кинетику ее утончения, ускоряя истечение жидкости. В связи с этим влияние отрицательного расклинивающего давления на скорость истечения в данном исследовании не учитывалось.

Экспериментальная часть. Форма мениска зависит от двух параметров — радиуса его шейки r_0 и гидрофобности минеральной поверхности, характеризуемой одним из контактных углов. В нашем случае такими контактными углами являются: Θ_A , образованный в момент прорыва прослойки, и Θ_R , при котором отмечено начало перемещения линии смачивания; Θ_0 — равновесный краевой угол. Размер начального “сухого” пятна на минеральной поверхности, образовавшегося в результате локального прорыва жидкой прослойки, принят, как и в работе [15], на основе экспериментальных данных [16–18]. Этот размер определит второй параметр мениска — радиус его шейки. Для поверхностей с $\Theta_A < 90^\circ$ радиус шейки мениска r_0 примем равным радиусу нанопузырьков r_q , а для гидрофобных поверхностей $\Theta_A > 90^\circ$ r_0 будет меньше размера газового включения r_q и находится из формулы Лапласа.

Значения Θ_A , Θ_R и Θ_0 для ряда минералов определяли экспериментально. На рис. 1 приведена фотография пузырька с минимальным значением наступающего Θ_A и максимальным значением отступающего Θ_R контактных углов в момент начала движения пузырька.

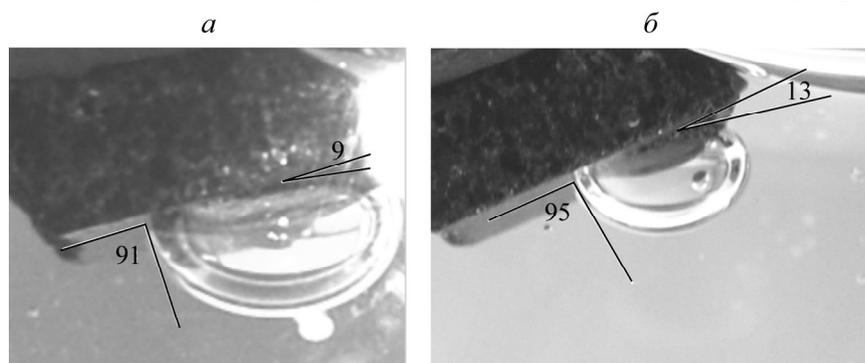


Рис. 1. Динамические контактные углы на исходной (а) и модифицированной бутиловым ксантогенатом (б) поверхности галенита Горевского месторождения

Расчет объема водной прослойки. Форму мениска, образовавшегося после локального прорыва прослойки, и объем воды, содержащейся в прослойке с указанным мениском, определяли для ряда минералов: пирротина (FeS), галенита (PbS), кварца (SiO_2) (табл. 1). Значение Θ_A позволило установить форму мениска и дать оценку объему жидкости, оставшейся в прослойке после локального ее прорыва. По значению Θ_R был определен объем воды в прослойке, ограниченной мениском с данным углом. Радиальная протяженность прослойки воды, находящейся между поверхностью минерала и границей раздела “газ–жидкость”, была принята равной 10 мкм и одинаковой для всех форм менисков.

ТАБЛИЦА 1. Результаты определения предельных контактных углов (наступающих и отступающих) по методу “прикрепленного пузырька” на ряде минералов

Условие	Среднее значение, град		
	Θ_0	Θ_A	Θ_R
Галенит			
Исходный образец	50	94	8
После обработки 0.1 % КхБ	52	93	13
Пирротин			
Исходный образец	39	75	9
После обработки 0.1 КхБ	51	79	9
Кварц			
Исходный образец	18	19	18
После обработки 0.1 % АНП	35	59	10

На поверхности твердого тела форму мениска с наступающим контактным углом описывает дифференциальное уравнение Лапласа

$$\frac{d^2z/dr^2}{[1+(dz/dr)^2]^{3/2}} + \frac{dz/dr}{r[1+(dz/dr)^2]^{1/2}} = \frac{q(\rho_L - \rho_g)^2}{\sigma_{L-g}}, \quad (1)$$

где $z(r)$ — высота мениска на расстоянии r от оси симметрии, м; σ_{L-g} — натяжение на границе раздела “газ – жидкость”, Н/м; ρ_L и ρ_g — плотность жидкости и газа, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с².

Граничные условия:

$$\frac{dz}{dr} = \text{tg}\Theta_A \quad \text{при } r = r_0; \quad \frac{dz}{dr} = 0 \quad \text{при } r = \infty. \quad (2)$$

Здесь r_0 — радиус шейки мениска; Θ_A — контактный угол.

Форму мениска определяли путем численного решения (1) с граничными условиями (2). Расчеты выполнены по алгоритму, приведенному в [15]. На рис. 2 приведены формы мениска, соответствующие двум контактным углам $\Theta_A = 93$ и 13° . Радиус посадочной площадки мениска на минеральной поверхности принят равным 40 \AA , что соответствует значению радиальной координаты в точке контакта трех агрегатных состояний. Объем воды, содержащейся в прослойке V (м³), вычисляли интегрированием уравнения $z(r)$ в пределах от r_0 до 10^{-5} (м) радиуса минеральной частицы

$$V = \int_{r_0}^{10^{-5}} z(r) dr.$$

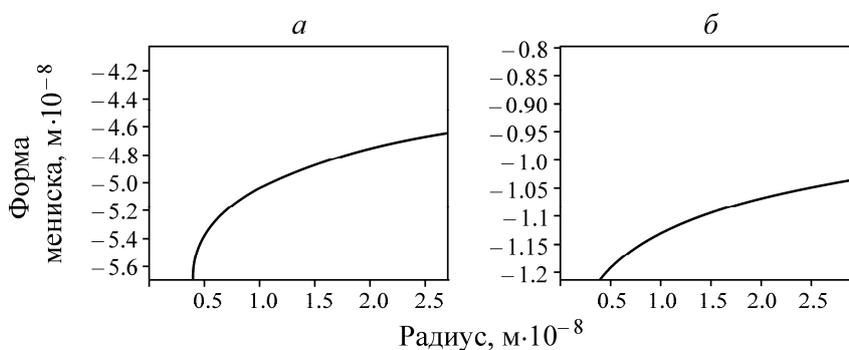


Рис. 2. Формы менисков, образованных на обработанной поверхности галенита, радиус посадочной площадки мениска 40 \AA : a — наступающий контактный угол 93° ; b — отступающий контактный угол 13°

Таким образом, если на поверхности модифицированного бутиловым ксантогенатом галенита находится нанопузырек, диаметр площади которого на минерале составляет 80 \AA , то после прорыва жидкой прослойки на месте нанопузырька образуется мениск с наступающим статическим контактным углом $\Theta_A = 93^\circ$ и высотой 569.34 \AA (рис. 2а). Объем воды, содержащейся в прослойке после ее прорыва, составит $1.0088 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3$ (табл. 2).

Перемещение линии смачивания возможно при трансформации наступающего контактного угла в отступающий динамический Θ_{RD} . Согласно табл. 1, отступающий контактный угол для модифицированного галенита составил 13° . Форма мениска с отступающим контактным углом приведена на рис. 2б, высота прослойки жидкости 121.59 \AA . Объем воды, содержащейся в прослойке в момент достижения формой мениска отступающего контактного угла, составил $2.0650 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3$ (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Основные параметры менисков и ограниченных ими прослоек

Параметр	$\Theta = 13^\circ$	$\Theta = 93^\circ$	Разность высоты прослоек и объемов воды в прослойках
Радиус шейки мениска r_0 , м	$4.0000 \cdot 10^{-9}$	$4.0000 \cdot 10^{-9}$	
Радиус точки контакта r_c , м	$4.0000 \cdot 10^{-9}$	$4.0029 \cdot 10^{-9}$	
Толщина слоя пленки h , м	$1.2159 \cdot 10^{-8}$	$5.6934 \cdot 10^{-8}$	
Объем между r_0 и 10^{-5} м V , м^3	$2.0650 \cdot 10^{-18}$	$1.0088 \cdot 10^{-17}$	$0.8023 \cdot 10^{-17}$

Обсуждение результатов. Как уже указывалось, разделение сульфидов и минералов вмещающих пород (силикатов, окислов) не представляет трудностей. Электростатическая составляющая расклинивающего давления для частиц вмещающих пород имеет положительное значение и препятствует сближению объектов до критического значения. Пузырек газа не закрепляется на поверхности кварца при высоких значениях pH. Структурные силы в этом случае имеют сравнительно небольшое значение. Электростатические силы значительно превосходят их по значению и дальнему действию, что объясняет стабильность достаточно толстых водных прослоек на минералах породы. Понижение pH до 2–4 приводит к формированию контакта трех агрегатных состояний и закреплению пузырька на кварце.

Флотация сульфидов практически всегда выполняется в щелочной области pH. Насыщение пульпы воздухом вызывает окисление поверхности сульфидов. В начальной стадии окисления сульфиды становятся малополярными, а в технологическом плане плохо различимыми. Требуются более совершенные методы повышения селективности разделения таких минералов. Рассмотрим влияние десорбируемой формы флотационного реагента на селекцию извлечения сульфидов с близкими поверхностными свойствами ($\zeta \cong 0$).

На рис. 2 представлены прослойки с менисками, имеющими наступающий Θ_A (рис. 2а) и отступающий Θ_R (рис. 2б) контактные углы. Если объекты взаимодействия: пузырек и частица — имеют возможность сблизиться на расстояние, равное или меньшее критической толщины прослойки, то произойдет ее прорыв. Для обработанной бутиловым ксантогенатом поверхности галенита критическая толщина прослойки равна глубине начального мениска с $\Theta_A = 93^\circ$ (табл. 1). Перемещение линии смачивания по грани минеральной частицы за счет гидрофобного эффекта возможно, когда образовавшийся при прорыве угол $\Theta \leq \Theta_{RD} = 13^\circ$, или, например, при механическом воздействии на мениск. Эту функцию выполняют десорбируемые формы флотационного реагента. Их активность по отношению к границе раздела “газ–жидкость” и плотность сорбции на минерале определяют скорость удаления воды из прослойки до значения, при котором формируется мениск с отступающим динамическим контактным углом Θ_{RD} . Объем воды, равный разности объемов воды в прослойках с исходным и деформированным менисками, удаляется растекающимися по границе раздела “газ–жидкость” десорбируемыми формами реагента.

Указанный объем в нашем примере составил $0.8023 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3$. Его значение определит количество воды, которую необходимо удалить для самопроизвольного расширения “сухого” пятна на минерале и требуемую силу десорбируемых форм флотационного реагента. Оставшийся объем ($2.0650 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3$) определит необходимую собирательную силу химически закрепившегося флотационного реагента. Под силой флотационного реагента здесь понимается мера его воздействия на жидкость в прослойке.

Количество воды, удаляемой десорбируемыми формами, имеет определенное оптимальное значение, зависящее от плотности сорбции химически закрепившегося реагента и Θ_{RD} . В первом приближении это количество можно принять равным разности объемов воды в прослойках, ограниченных менисками с контактными углами: Θ_A и Θ_{RD} . Основными факторами, которые обуславливают собирательные свойства десорбируемой формы реагента, являются длина и разветвленность углеводородного радикала, наличие и количество двойных связей, заместителей. Модифицируя структуру углеводородного фрагмента, можно изменять собирательную способность десорбируемых форм и скорость удаления воды из прослойки, увеличивая или сокращая период времени, за который достигается Θ_{RD} . Далее осушение минерала под пузырьком будет осуществляться преимущественно за счет гидрофобного вытеснения воды. При этом проявятся индивидуальные свойства минеральной поверхности.

Усиление активности десорбируемых форм реагента сверх оптимального значения приведет к увеличению его собирательной активности, увеличению удаляемого ими объема воды на извлекаемом минерале и на минерале конкуренте, что снизит селективность флотационного разделения. Осушение минерала под пузырьком в этом случае будет осуществляться преимущественно десорбируемыми формами реагента. Различие во флотационных свойствах разделяемых минералов на данном этапе формирования флотационного контакта не окажет влияния на его образование. Эффект от физической формы сорбции реагента проявляется на границе раздела “газ – жидкость”, а не на границе “минерал – жидкость”. Увеличение объема воды, вытесняемой десорбируемыми формами реагента, и достижение $\Theta_{RD} \rightarrow 0$ приведет к снижению качества концентрата. Индивидуальные свойства минеральной поверхности при этом не окажут влияния на селективность формирования флотационного контакта.

Флотационные свойства химической формы сорбции обусловлены в основном солидофильной группой реагента. Избирательная гидрофобизация требуемого минерала определит селективность закрепления на его поверхности десорбируемых форм флотационного реагента. Их высокая собирательная способность проявится при формировании флотационного контакта преимущественно в отношении флотируемого минерала. Нарушение избирательности гидрофобизации требуемого минерала приведет к попаданию десорбируемых форм с высокой собирательной активностью на минерал конкурент. Селективность разделения минералов при этом нарушится. По этой причине слабый реагент, например с более коротким углеводородным фрагментом и низкой собирательной способностью его десорбируемых форм, будет обладать лучшими селективными характеристиками. В нашем примере скорость растекания десорбируемых форм этилового ксантогената уступает скорости растекания десорбируемых форм бутилового ксантогената. Этиловый ксантогенат имеет более высокие селективные свойства. Этот факт известен специалистам и широко используется при разработке селективных режимов флотации.

ВЫВОДЫ

Определены предельные значения наступающего и отступающего контактных углов на поверхности ряда сульфидных минералов. Количественный расчет соотношения флотационных активностей химической и физической форм сорбции на примере галенита показал высокую собирательную способность десорбируемых форм реагента.

Избирательная гидрофобизация требуемого минерала химически сорбированным реагентом определит селективность закрепления на его поверхности десорбируемых форм реагента. Усиление собирательной способности десорбируемых форм флотационного реагента относительно оптимального ее значения приведет к снижению качества концентрата.

На стадии локального прорыва водной прослойки и ее удаления в результате эффектов обеих форм сорбции реагента качество концентрата будет зависеть от соотношения собирательных активностей указанных форм реагента, соотношения наступающего и отступающего контактных углов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Aronson M. P., Princen H. M.** Aqueous films on silica in the presence of cationic surfactants, *Colloid & Polymer Science*, 1978, Vol. 256.
2. **Laskowsky L., Kitchener J. A.** The hydrophilic – hydrophobic transition on silica, *Journal of Colloid and Interface Science*, 1969, Vol. 24, No.4.
3. **Пшеницын В. И., Русанов А. И.** О краевых углах смачивания на свежесформированных поверхностях ионных кристаллов // *Коллоид. журн.* — 1979. — Т. 41. — № 1.
4. **Чураев Н. В.** Включение структурных сил в теорию устойчивости коллоидов и пленок // *Коллоид. журн.* — 1984. — Т. 46. — № 2.
5. **Чураев Н. В.** О силах гидрофобного притяжения в смачивающих пленках водных растворов // *Коллоид. журн.* — 1992. — Т. 54. — № 5.
6. **Pan L., Jung S., Yoon R-H.** Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, Vol. 261.
7. **Pan L., Yoon R-H.** Role of disjoining pressure and curvature pressure in bubble-particle interactions. *International mineral processing congress (impc) 2012, proceedings, New Delhi, India, 24–28 September 2012.*
8. **Pan L., Jung S., Yoon R-H.** A fundamental study on the role of collector in the kinetics of bubble-particle interactions. *International journal of mineral processing*, 2012, Vol. 106–109.
9. **Finch J. A., Smith G. W.** Dynamic surface tension of alkaline dodecylamine solutions, *Journal of Colloid and Interface Science*, 1973, Vol. 45, No.1.
10. **Hyunsun Do.** Development of a Turbulent Flotation Model from First Principles. Dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics. Blacksburg, Virginia, 2010.
11. **Kirjavainen V., Schreithofer N., Heiskanen K.** Effect of some process variables on flotability of sulfide nickel ores, *Int. J. Miner. Process*, 2002, Vol. 65.
12. **Kuoranportti H., Suorsa T., Dahl O., Niinimäki J.** A model of conditioning in the flotation of a mixture of pyrite and chalcopyrite ores, *Int. J. Miner. Process*, 2000, V.59.
13. **Кондратьев С. А., Рябой В. И.** Оценка собирательной силы дитиофосфатов и ее связь с селективностью извлечения полезного компонента // *Обогащение руд.* — 2015. — № 3.
14. **Плаксин И. Н., Шафеев Р. Ш.** Влияние электрохимической неоднородности поверхности сульфидных минералов на распределение ксантогената в условиях флотации // *ДАН СССР.* — 1958. — Т. 121. — № 1.
15. **Кондратьев С. А., Мошкин Н. П.** Селективность флотационного разделения минералов, обусловленная химически закрепившимся реагентом // *ФТПРПИ.* — 2014. — № 4.
16. **Brenner M. P., Lohse D.** Dynamic Equilibrium Mechanism for Surface Nanobubble Stabilization, *The American Physical Society, Physical review letters*, 2008, Vol. 101(21).
17. **Simonsen A. C., Hansen P. L., Klösgen B.** Nanobubbles give evidence of incomplete wetting at a hydrophobic interface, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, Vol. 273.
18. **Zhang X. H., Li G., Maeda N., Hu J.** Removal of induced nanobubbles from water/graphite interfaces by partial degassing, *Langmuir*, 2006, Vol. 22.

Поступила в редакцию 6/Х 2015